

电阻缝焊制备核壳结构铁基非晶纳米晶涂层及温度场数值模拟

潘昌桂 王建兴 秦平

江西应用技术职业学院

DOI:10.12238/bd.v9i2.4380

[摘要] 通过电阻缝焊技术,将90–60 μm 和20–30 μm 非晶粉末按6:4比例混合,成功在SUS304不锈钢表面制备了以非晶相为核(47.8%)、 α -Fe纳米晶为壳的梯度涂层。TEM分析表明,核区为非晶,壳区为 α -Fe纳米晶。涂层硬度达1340Hv,较单一非晶涂层提升100Hv。基于电-热耦合模型,揭示了温度场U型梯度分布(中心1250K左右)诱导非晶选择性晶化的机制:表层热累积触发晶化(晶化温度1150K左右)。模拟与实验温度误差<2%,证实模型可指导涂层结构调控。

[关键词] 电阻缝焊(RSW); 非晶纳米晶涂层; 数值模拟; 电热耦合; 核壳结构

中图分类号: TM924 文献标识码: A

Resistance Seam Welding of Fe-Based Core-Shell Amorphous-Nanocrystalline Coatings: Fabrication and Temperature Field Evolution

Changgui Pan Jianxing Wang Ping Qin

JIANGXI COLLEGE OF APPLIED TECHNOLOGY

[Abstract] By employing resistance seam welding (RSW), a graded coating with a core-shell structure was successfully fabricated on the surface of SUS304 stainless steel using a 6:4 mixture of 90–60 μm and 20–30 μm amorphous powders. Transmission electron microscopy (TEM) analysis revealed that the core region consists of an amorphous phase (47.8%), while the shell region comprises α -Fe nanocrystalline phase. The coating exhibited a hardness of 1340 Hv, which is 100 Hv higher than that of a single amorphous coating. Based on an electro-thermal coupled model, the mechanism of selective crystallization of the amorphous phase was elucidated: a U-shaped temperature gradient (center temperature about 1250 K) induced non-uniform crystallization, with thermal accumulation in the surface layer triggering crystallization at a temperature of ~ 1150 K. The simulation and experimental temperature data showed an error of $<2\%$, confirming the model's capability to guide structural optimization of the coating.

[Key words] Resistance seam welding (RSW); Amorphous-nanocrystalline coating; Numerical simulation; Electro-thermal coupling; Core-shell structure

引言

非晶材料,又称金属玻璃,其原子排列呈现长程无序(无平移周期性)但短程有序的结构。与晶体材料不同,非晶态材料没有位错、晶界等缺陷,结构均匀致密,所以具有高耐蚀性^[1]。纳米晶材料相较于传统晶体材料,则具备高强度和高耐磨损性。将非晶与纳米晶结合,能制备出兼具抗腐蚀和耐磨损性能的非晶纳米晶复合材料。但目前难以制备大尺寸的非晶纳米晶块体坯料,这限制了它作为结构材料的大规模应用^[2]。因此,把非晶纳米晶合金制成涂层涂覆在金属材料表面,成为发挥其优良性能的有效途径,有望推动其在航空航天、船舶制造等领域的广泛应用。

目前,激光熔覆和热喷涂是制备非晶纳米晶涂层的常用技

术。其中,热喷涂应用广泛,它凭借高加热温度和喷涂速度,让喷涂颗粒在快速熔化凝固时获得高冷却速率,利于非晶形成及部分转化为纳米晶。然而,热喷涂制备的涂层存在孔隙和氧化物层等缺陷,会显著影响涂层的服役性能,尤其是耐腐蚀性。激光熔覆则是利用高能密度激光束快速熔化合金与基体材料表面,产生高温梯度来制备复合涂层。但非晶纳米晶的高脆性,导致其在激光处理时易出现裂纹,而且高能激光束还会稀释基体,改变非晶组分,严重阻碍非晶纳米晶的成形^[3]。

电阻缝焊(RSW)通过加压通电,利用接触电阻热实现焊接,具有升温快、可控性强的特性。制备非晶涂层时,电流流经粉末产生的接触电阻热集中于颗粒接触面,在高温压力下粉末粘合导致电阻下降、热量减少,通过调控热输入可避免中心区域非晶

结构晶化^[4],因此RSW适用于非晶涂层制备。现有研究显示,尽管电阻缝焊数值模拟已获大量关注^[5],但RSW制备涂层的研究尚未见报道。同时,粉末颗粒尺寸及配比调控焦耳热生成、进而影响非晶纳米晶结构与比例的机理仍不明确,亟待深入探究。

本文以不锈钢板材为基体,性能优异且成本低廉的铁基非晶Fe-Cr-Mo-C-B-Si为涂层粉末,使用不同大小比例粉末和比例制备涂层,采用热电偶测量涂层温度及有限元软件Comsol中的电-热耦合有限元方法计算分析制备过程温度场的动态分布。

1 试验方法

试验采用电阻熔覆设备在SU304不锈钢制备铁基非晶纳米晶涂层,雾化Fe_{23.8}Co_{3.8}Cr_{9.3}Mo_{4.7}C₄₀B_{17.8}Y_{0.6}(at%)粉末作为熔覆材料,采用筛网筛选90-60 μm和20-30 μm粉末颗粒,两者比例设置为6:4,置于球磨机中混合。采用电阻熔覆设备,利用中频脉冲电流缝焊机进行涂层制备。焊机脉冲电流周期设定为0.005s,电极轮直径为300mm。试验焊接参数为:焊接电流24A、焊接速度4mm/s。熔覆时采用0.5mm直径探头的K型热电偶测量涂层边缘温度,以此获取温度变化数据。

制备完成后,采用X衍射仪(XRD)及透射电子显微镜(TEM)对涂层的相结构进行表征,利用显微硬度计在0.98N载荷下保持10s,测试涂层硬度,以全面分析涂层的组织结构和性能。

2 有限元分析方法

利用Comsol软件中电-热耦合模块,数值模拟电阻缝焊(RSW)制备铁基非晶纳米晶涂层的温度场。首先依实际熔覆工况构建三维模型,接着添加各区域材料属性,再结合试验参数与实际设定边界条件并划分网格,然后将电流和固体传热以焦耳热形式耦合,设置好计算时间和步长后进行计算,得出结果。

2.1 电热耦合分析

2.1.1 电流分析

电流进行简化,选择直流端口,基于欧姆定律建立电流守恒方程: $\nabla \cdot J = 0$, 由 $J = \sigma E$ 、 $E = -\nabla U$, 因此方可写为:

$\nabla \cdot J = \nabla(\sigma E) = \nabla(-\sigma \nabla U) = 0$, 式中 σ 为电导率(S/m) J 为电流密度(A/m²), E 为电场强度(V/m) U 为电势(V), E 为电场强度(V/m)。

2.1.2 固体传热分析

电阻缝焊时,焦耳热由热传导扩散至其他区域,其传热方程如下:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_{trans} \cdot \nabla T \right) + \nabla \cdot (q + q_r) = -\alpha T: \frac{dS}{dt} + Q$$

其中, C_p 为恒压热容(J/(kg·K)), ρ 为密度(kg/m³), q_r 是辐射的热通量(W/m²), α 为热膨胀系数(1/K), u_{trans} 为平移运动的速度矢量(m/s), Q 为热源(W/m³), q 为传导的热通量(W/m²)。

2.1.3 电磁热分析

电磁加耦合场中热方程的电阻加热公式为:

$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = Q_e$; 而单纯电流的电阻加是: $Q_e = J \cdot E$, 其中,

J 为电流密度(A/m²), E 是电场强度(V/m)。

2.2 模型简化及网格划分

为使模型更好收敛并减少计算量,对模型进行了如下简化:其一,模型仅保留动网格、电流、固体传热这三个物理场;其二,考虑到实际中电极轮与粉末层尺寸差异大,且电极轮旋转角度仅19.10°,故将电极轮的滚动运动简化为平移运动;其三,在电极轮底部切割出一个平面,以此替代粉末与电极轮的实际接触状况。简化模型见图1,结构由上至下依次为铜电极轮(四面体网格划分)、粉末层、304基板及基座三者采用自由四面体网格,并对接触面区域进行加密处理,以提升计算精度。

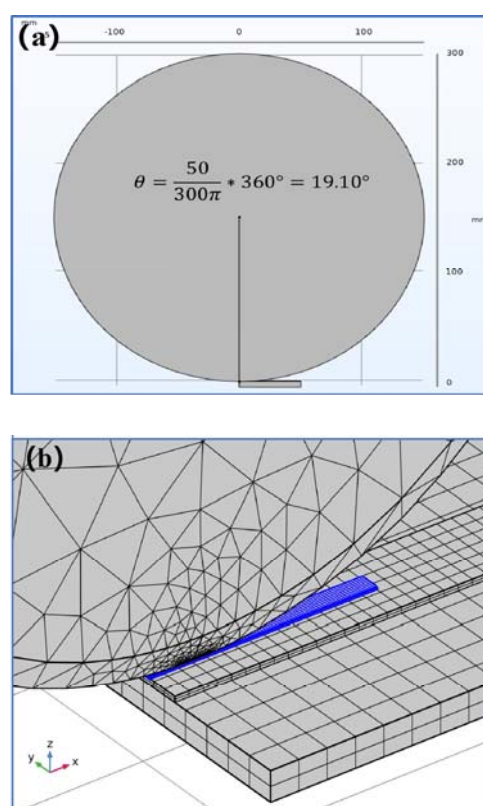


图1 (a) 电极轮与粉末层尺寸对比, (b) 网格划分

2.3 初始条件和边界条件的处理

动网格场负责电极轮的平移,电极轮沿x轴正方向平移,速度0.004m/s,设置指定变形、变形域及固定边界节点。电流场以恒定直流电代替中频交流电,添加终端、接地及4个电接触对节点。固体传热中,初始温度设为20℃,添加热通量、表面对环境辐射、热接触节点若干。

2.4 材料属性

模型涉及铬钴铜、SUS 304、非晶粉末和空气。304不锈钢以及铬钴铜属性由COMSOL直接给出,非晶粉末电导率取自四探针法实测值(0.469×10^6 S/m),与文献报道的Fe基非晶退火态电导率($0.45-0.50 \times 10^6$ S/m)一致^[4]。

3 结果与分析

3.1 涂层的相结构分析

图2(a)为涂层SEM图,可以看出涂层与基体结合紧密。图2(b)为涂层的XRD图,如图所示涂层由一个非晶相(宽泛峰)和结晶相(尖锐的衍射峰) α -Fe,借助MDI Jade 软件拟合Pseudo-Voigt函数拟合涂层中非晶含量,得到非晶率为47.8%。

为了进一步分析确定涂层中的相组成,进行TEM分析。如图3(a)所示,TEM图像显示灰色非晶区域包裹白色纳米晶区域,证实核壳结构形成。图3(b)是图3(a)中灰色区域(B区域)的HRTEM及快速傅里叶变换图像(FFT),结果表明灰色区域原子排列无序,且显示为一个宽泛的月晕环,这说明灰色区域为非晶相。在图3(c)中,白色区域对应的选定区域电子衍射(SAED)图案为衍射斑环和晕环,分析得出 α -Fe纳米晶,这与XRD结果一致。

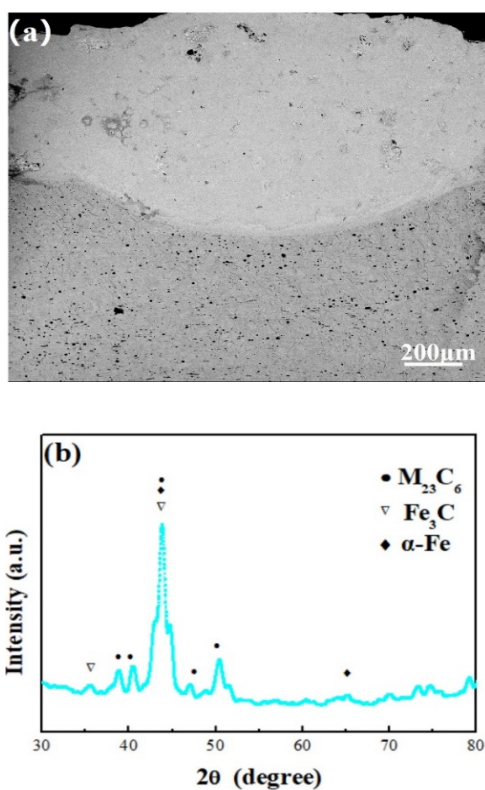


图2 涂层组织分析结果: (a) 涂层截面SEM图, (b) XRD图

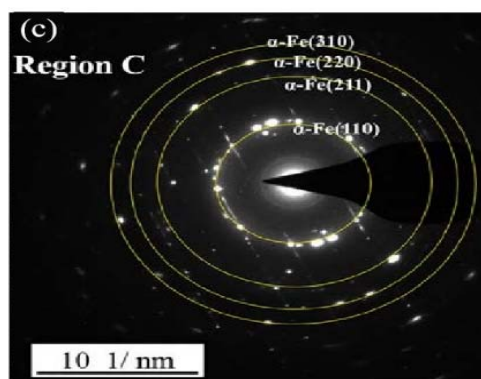
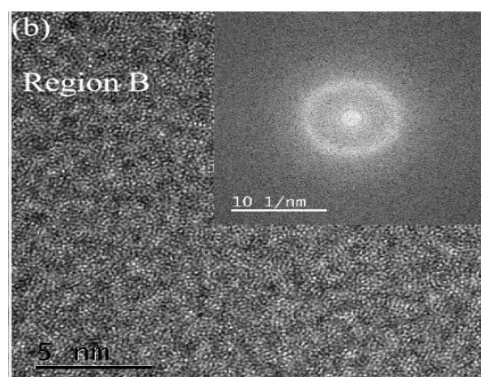
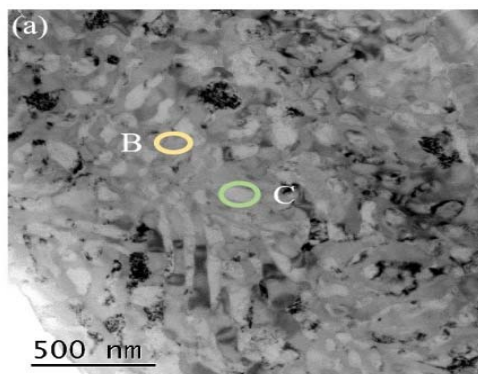


图3 TEM结果: (a) 亮场图, (b) B区域的HRTEM图像及FFT, (c) 区域C的衍射斑点图

3.2 涂层硬度分析

图4为涂层沿厚度方向的显微硬度分布曲线,涂层硬度沿厚度方向分布均匀,平均值为1340Hv,比之前制备的涂层硬度提高100Hv左右,根据Hall-Petch公式,纳米晶相(平均粒径15nm)提升硬度;非晶/纳米晶界面通过位错钉扎效应(Orowan机制)提供额外强化。

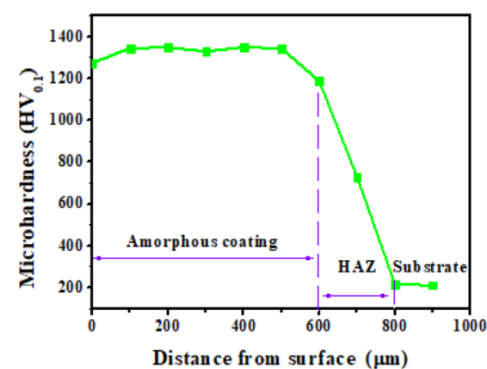


图4 涂层硬度分布图

3.3 电阻缝焊(RSW)温度模拟场分析

采用K型热电偶,在基板 $x=21\text{mm}$ 、距涂层 0.4mm 处测温,并提取模型同位置模拟温度曲线(见图5)。试验与模拟温度曲线起始

值因模拟环境温度设定而一致。试验曲线5.12s达峰值700.02K, 模拟曲线4.93s达686.16K, 峰值误差1.98%, 达峰时间相近; 12s测试结束时, 试验温度450.12K与模拟值456.76K误差1.13%。考虑有限元计算的网格划分、模型简化等因素, 两者结果高度吻合, 误差在工程允许范围内, 验证模拟方法可靠。

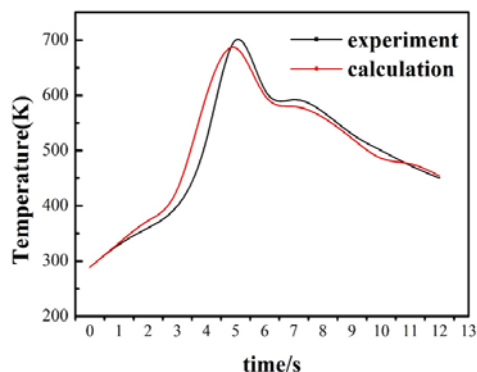


图5 试验值与模拟值对比

如图6所示, 熔覆稳定时, X0Z截面存在A、B、C三个高温区域, 温度从高到低依次为A区、C区、B区, 且B区上部温度低于下部。这种温度差异主要由产热和散热决定。一方面, A、C、B区电流密度依次降低, 根据焦耳定律, 电流越大, 产生的焦耳热越多, 所以A区产热最多。另一方面, 电极轮移动时, 区域交替变化, 前一时刻的B、C区变为后一时刻的A、B区, 使得A区有较好温度基础, 加上其左侧是上一时刻的A区, 温度梯度小、散热差; 而C区右侧电流密度小、温度低, 导致C区温度低于A区。B区上部与大尺寸铜电极轮接触, 散热快, 所以上部温度低于下部。最终稳定时, 温度呈左高右次中低的U型梯度分布, 最大温度值为1250K左右。

如图7所示, 在涂层中心横向选取X=20、25、30mm的3个点, 绘制热循环曲线。曲线升温分两段, 中间有降温过程, 第二次升温结束后才正式冷却, 该过程与制备稳定时温度的U型梯度分布一致。第一次升温对应C区, 第二次升温对应A区, A区温度高于C区。中间降温过程对应B区, B区温度低于C区, 且由于导热性良好的电极轮与涂层平面接触, 加快了散热, 提高了传热效率, 从而出现这种温度变化。

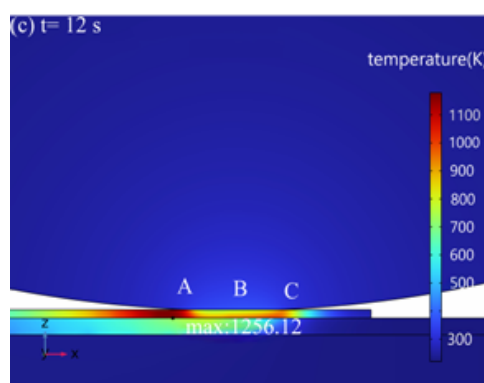
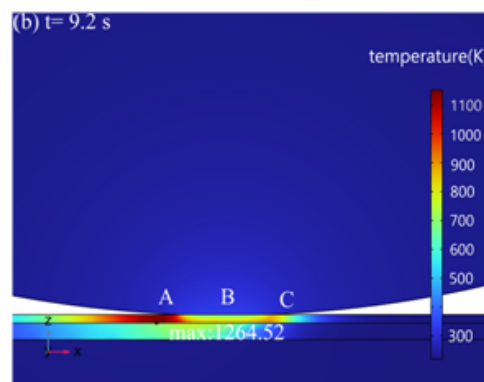
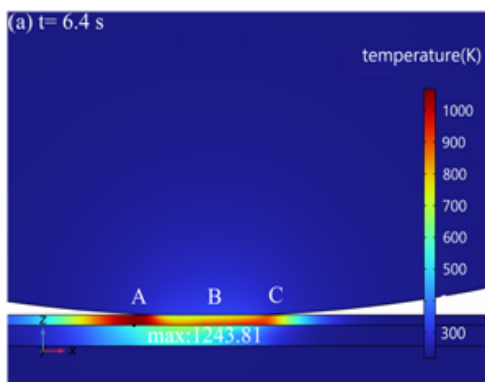


图6 X0Z截面模拟及试验温度分布

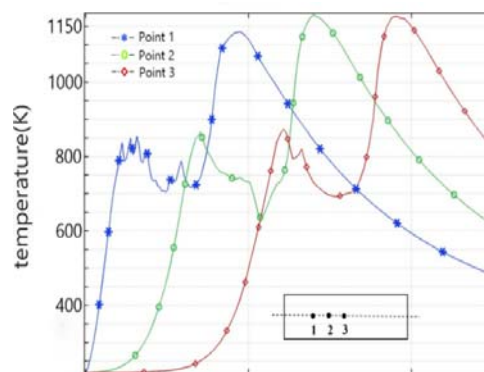


图7 横向不同点温度热循环曲线

4 结论

(1) 通过电阻缝焊 (RSW) 技术, 选择90-60 μm 和20-30 μm 不同直径粉末颗粒, 按照6:4比例混合, 成功制备了核壳结构的非晶纳米晶涂层, 其硬度高达1340Hv。

(2) 实验与模拟温度误差<2%, 验证了模型的可靠性。

(3) 稳定时, 温度场在涂层纵方向上无变化, x0z截面呈左高右次中低U型分布, 对应焊接循环曲线“升-降-升”变化。这种温度分布诱导非晶选择性晶化的机制: 表层热累积触发晶化 (非晶粉末的晶化温度1150K左右)。

[项目名称]

江西省教育厅科技重点项目,电阻熔覆制备核壳结构非晶/纳米晶复合涂层的研究项,项目编号: GJJ2205001。

[参考文献]

- [1] Lan S, Zhu L, Wu Z D, et al. A medium-range structure motif linking amorphous and crystalline states[J]. Nature Materials, 2021, 20(10): 1347–1352.
- [2] A. L. Greer, Y. Q. Cheng, E. Ma, Shear bands in metallic glasses. Mater. Sci. Eng. R Rep., 74(2013), pp. 71–132. based amorphous/crystalline composite coating, Mater. Charact. 127(2017) 239–247.

[3] 蔡忠志, 电阻熔覆过程中热力学、应力场及温度场[D]. 南昌大学, 2022.

[4] Pan C G, Zhang R, Wang D, et al. Preparation of high performance Fe-based amorphous coating by resistance seam welding [J]. Surface & Coatings Technology, 2021, 408: 126813.

[5] 王文琴, 徐永东, 韩召先, 等. 电阻缝焊制备铁基非晶涂层温度场数值模拟[J]. 焊接学报, 2024(8): 09.

作者简介:

潘昌桂(1995--), 男, 汉族, 江西赣州人, 硕士研究生, 助教, 研究方向(工作领域): 金属涂层制备, 数值模拟。